

①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENT- UND
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**
⑩ **DE 197 44 302 A 1**

⑤1 Int. Cl.⁶:
G 02 B 21/00
G 02 B 27/00

②1 Aktenzeichen: 197 44 302.8
②2 Anmeldetag: 8. 10. 97
④3 Offenlegungstag: 15. 4. 99

⑦1 Anmelder:
Carl Zeiss Jena GmbH, 07745 Jena, DE

⑥1 Zusatz zu: 196 22 359.8

⑦2 Erfinder:
Simon, Ulrich, Dr., 07743 Jena, DE; Wolleschensky,
Ralf, 99510 Schöten, DE

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

⑤4 Vorrichtung zur Einkopplung der Strahlung von Kurzpulslasern in einem mikroskopischen Strahlengang

DE 197 44 302 A 1

DE 197 44 302 A 1

3

Die Erfindung ist in DE eine Zusatzanmeldung zur Anmeldung DE 196 22 359.8 vom 04.06.1997 sowie für die USA eine Continuation - In Part zu US Ser. No 08/826, 906, filed Apr. 09, 1997.

Die Erfindung beschreibt eine kompakte Einheit zur Veränderung des Chirp-Zustandes (zeitliche Abfolge spektraler Komponenten) von kurzen Laserpulsen.

Der Einsatz von Kurzpulslasern ist aus US 5034613 bei der "Zwei-Photonen Laser Mikroskopie" bekannt.

Aus US 5161053 ist es an sich bekannt, das Licht einer Laserlichtquelle über Lichtleitfasern in einen konfokalen Abtaststrahlengang einzukoppeln.

Üblicherweise erleiden kurze Pulse beim Durchlaufen dispersiver Medien aufgrund des Phänomens der Gruppengeschwindigkeits-Dispersion (GVD: group velocity dispersion) eine Veränderung (i.a. eine Verlängerung) ihrer zeitlichen Pulsdauer. Zudem können im dispersiven Medium, aufgrund der mit den kurzen Pulsen einhergehenden hohen Pulsspitzenleistungen und Pulsintensitäten, nicht-lineare optische Phänomene (wie z. B. Selbst-Phasenmodulation, Brillouinstreuung, Ramanstreuung, etc.) praktisch relevant werden., die die spektrale Zusammensetzung der kurzen Pulse beeinflussen.

Im "Handbook of biological confocal microscopy", S. 447, 448 wird vorgeschlagen, durch Prismen- oder Gitteranordnungen die GVD von optischen Gläsern zu kompensieren.

Allerdings wird hier in Frage gestellt, ob dies wegen der komplexen Justierprobleme und Energieverluste Verbesserungen bringt.

Erfinderische Aufgabe ist eine vorteilhafte Einkopplung von Kurzpulslasern, beispielsweise bei der Zwei-Photonen Mikroskopie, in den mikroskopischen Strahlengang; insbesondere eines Laser-Scanning-Mikroskopes.

Die Aufgabe wird durch die Merkmale des Anspruchs 1 gelöst.

Bevorzugte Weiterbildungen sind Gegenstand der abhängigen Ansprüche.

Die Erfindung betrifft insbesondere die Einkopplung von Kurzpuls-Lasern (Picosekunden bis Femtosekunden-Pulsdauern) in ein Laser-Scanning Mikroskop mit Hilfe von Lichtleitfasern.

Hierdurch ist der Einsatz von Kurzpuls-Lasern als Anregungsquelle, vorzugsweise in der 2-Photonen-Mikroskopie und der zeit- und orts aufgelösten Mikroskopie, möglich, wobei diesen Techniken alle Vorteile der Faserkopplung, wie z. B. hohe Flexibilität im optischen Aufbau, hohe Laser-Strahlrichtungsstabilität und gute Laserstrahlqualität, insbesondere bei Kopplung in Monomode-Fasersysteme, zugute kommen.

Durch die Erfindung werden die Pulse vorteilhaft vor dem Eintritt in die Lichtleitfaser derartig präpariert, daß Pulsform und Pulslänge in der zu untersuchenden Probe derjenigen am Laserausgang praktisch entspricht. Dadurch lassen sich die Vorteile des Einsatzes kurzer Pulse sowie des Einsatzes von Lichtleitfasern kombinieren.

Um den Laufzeitunterschieden der verschiedenen spektralen Anteile der kurzen Pulse durch die vorhanden dispersiven Medien (inklusive der Lichtleitfaser) entgegenzuwirken, wird eine optische Vorrichtung eingesetzt, die die GVD und die Dispersion höherer Ordnung des gesamten optischen Systems kompensieren kann.

Diese Vorrichtung soll den langsameren spektralen Anteilen der kurzen Pulse mittels für diese Anteile wirksamer verkürzter optischer Wege, einen zeitlichen Vorsprung einräumen.

Die technische Realisierung dieser Vorrichtung kann, wie im Ausführungsbeispiel dargestellt, Prismen- oder Gitteranordnungen, oder Kombinationen beider sowie Kombinationen mit reflektierenden Elementen, enthalten.

Den kurzen Pulsen wird damit, vor dem Eintritt in die Lichtleitfaser, ein hinreichendes Maß negativer GVD aufgeprägt, so daß sie nach Durchlaufen der Faser und des übrigen optischen Systems in der Probe ihre Original-Pulsform wiedererlangen.

Durch die mit Hilfe einer geeigneten "Prechirping-Unit" den Pulsen aufgeprägte negative GVD am Eingang der Lichtleitfaser, werden die kurzen Pulse so stark zeitlich verbreitert, daß die Pulsspitzenleistungen und Intensitäten innerhalb der Lichtleitfaser unterhalb den, für das Auftreten von nicht-linearen Phänomenen kritischen Werten liegen.

Dadurch wird gewährleistet, daß die kurzen Pulse beim Durchlaufen der Lichtleitfaser zwar ihre zeitliche Form, nicht jedoch ihre spektrale Zusammensetzung verändern.

Die in "Laser-Spektroskopie" von W. Demtröder, Springer-Verlag 1991, S. 418 ff, bei der optischen Pulskompression beschriebene "Selbstphasen-Modulation" tritt daher vorteilhaft nicht auf.

Insbesondere beim Einsatz von Monomode-Lichtleitern kann, aufgrund der Wirkung der Faser als räumliches Filter, das räumliche Strahlprofil der Laserstrahlung in der Probe gegenüber demjenigen am Laserausgang des Anregungslasers verbessert werden.

Dies ist insbesondere bei Techniken wie der 2-Photonen-Mikroskopie von Vorteil, da gute Fokussierbarkeit des Anregungsstrahls und die daraus folgende hohe 2-Photonen-Anregungswahrscheinlichkeit ein sauberes Laserstrahlprofil zwingend erfordern.

Durch dieselbe Lichtleitfaser, die zur Übertragung der kurzen Pulse eingesetzt wird, können gleichzeitig auch andere Laser in das Laser-Scanning Mikroskop eingekoppelt werden. Damit kann der gleiche Objektpunkt mit mehreren Lasern, simultan oder zeitlich hintereinander, bestrahlt werden. Der Einsatz von Monomode-Lichtleitfasern oder von Multimode-Lichtleitfasern in Verbindung mit anschließender beugungsbegrenzter Fokussierung durch eine Blende zur räumlichen Filterung des Anregungslaser-Strahlprofils in Verbindung mit Kurzpuls-Lasern gestattet eine bessere Fokussierbarkeit des Anregungslaserstrahls und damit eine höhere räumliche Auflösung bzw. auch 2-Photonen-Anregungswahrscheinlichkeit.

Es wird eine Verbesserung der Strahlrichtungskonstanz in Verbindung mit KurzpulsLasern erreicht. Dies erlaubt insbesondere das Optimieren des im allgemeinen komplexen und justier-intensiven Kurzpuls-Lasers, ohne daß eine Nachjustage des Laser-Scanning Mikroskops erforderlich wird.

Nach Optimieren des Kurzpuls-Lasers ist lediglich die Kopplungseffizienz in die Lichtleitfaser zu maximieren, der Strahlverlauf innerhalb des Mikroskops bleibt jedoch unverändert.

Die erfindungsgemäße Einheit zeichnet sich insbesondere durch eine besonders kompakte Bauweise durch die Verwendung eines einzelnen Gitters aus (anstelle der, zu diesem Zweck, üblicherweise eingesetzten zwei bis vier Gitter). Dadurch wird neben einem kompakten und damit besonders stabilen optischen Aufbau insbesondere eine einfache Justage der Einheit gewährleistet. Eine Anpassungen an Wellenlänge oder eine Veränderung der Dispersion können in diesem Aufbau vorteilhaft durch die Verstellung jeweils eines einzigen Freiheitsgrades realisiert werden. Die Einheit ermöglicht beispielhaft, den Chirp eines kurzen Laserpulses derartig zu modifizieren, daß der Laserpuls vorteilhaft z. B. durch ein dispersives optisches System, beispielhaft ein Fa-

serübertragungssystem, übertragen werden kann, ohne daß der Laserpuls dabei irreversibel in seiner spektralen Zusammensetzung verändert wird. Dadurch wird vorteilhaft der Transport kurzer Laserpulse an einen beliebigen Ort flexibel ermöglicht.

Die Erfindung wird nachstehend anhand der schematischen Darstellungen näher erläutert.

Es zeigen:

Fig. 1 Die Einkopplung über mehrere Gitter,

Fig. 2 Die Einkopplung über mehrere Prismen,

Fig. 3 Die Einkopplung über Gitter und Prismen,

Fig. 4 Eine Draufsicht auf den Strahlverlauf einer vorteilhaften Prechirping Unit PU,

Fig. 5 Eine Seitenansicht aus Richtung A in Fig. 4,

Fig. 6 Eine Schrägansicht aus Richtung B in Fig. 5,

Fig. 7 Eine grafische Darstellung der Gittergleichung, d. h. die Abhängigkeit des Gitter-Beugungswinkels b vom Einfallswinkel a , der Wellenlänge des Laserstrahls λ , der Gitterperiode d , der Beugungsordnung m ,

Fig. 8a Die Anordnung gemäß Fig. 4 mit beispielhaft dargestelltem Strahlverlauf für rote Wellenlängen R und blaue Wellenlängen B

Fig. 8b Eine Anordnung gemäß Fig. 1 mit vier Gittern G1-G4 und Wellenlängen R und B,

Fig. 9 Die Integration einer Einheit PU gemäß Fig. 4-6 in ein Laser-Scanning-Mikroskop.

In Fig. 1 gelangt das Licht einer Kurzpuls-Laserlichtquelle 1, die beispielsweise ein Titan-Saphirlaser mit Pulsdauern in einer Größenordnung von etwa 100 fs, aber auch ein Laser mit Pulsdauern im ps-Bereich sein kann, in eine hier aus vier Gittern 2.1, 2.2, 2.3, 2.4 bestehende "Prechirping Unit" PU 2. Ein Einzelimpuls I ist beispielhaft dargestellt.

Durch die wellenlängenabhängige Beugung am ersten Gitter 2.1, nach Kollimierung am Gitter 2.2 sowie der Wiederherstellung der Strahlverhältnisse bezüglich Strahldurchmesser und Parallelität durch die Gitter 2.3, 2.4 erhält der blaue Lichtanteil einen zeitlichen Vorsprung bezüglich des roten Lichtanteils.

Die hierdurch zeitlich verbreiterten Laserpulse I' gelangen über ein Einkoppelement 3 und eine Monomodefaser 4 in den Strahlengang eines konfokalen Scanningmikroskopes 5, hier schematisch angedeutet durch die Darstellung einer Auskoppeloptik 5.1 mit pinhole 5.2, teildurchlässigem Spiegel 5.3 einer X/Y-Scanning-Unit 5.4, Abbildungsoptik 5.5, Probe 5.6 Abbildungsoptik 5.7, pinhole 5.8 sowie Detektor 5.9.

In Fig. 2 sind anstelle der Gitter 2.1-2.4 in der PU 2 vier Prismen 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 vorgesehen, die eine zu den Gittern 2.1-2.4 analoge spektrale Aufspaltung mit anschließender Kollimierung und Strahlvereinigung bewirken.

Statt der hier vorgesehenen jeweils vier Gitter oder Prismen kann auch eine hier nicht dargestellte Anordnung aus jeweils nur zwei Gittern oder Prismen sowie einem Spiegel gewählt werden, der eine Rückführung des Strahlverlaufs, nach Reflexion am Spiegel und somit ein zweifaches Durchlaufen der Gitter- oder Prismenkombination bewirkt.

Durch den Einsatz mehrerer Spiegel kann weiterhin auch ein mehrfaches Durchlaufen der PU 2 bewirkt werden.

In Fig. 3 wird der zu erzielende Effekt durch die Kombination einer aus Prismen 7.1-7.4 bestehenden PU 7 mit einer aus Gittern 8.1-8.4 bestehenden PU 8 noch verstärkt.

Hier können insbesondere, wie bei der optischen Pulskompression beschrieben ("Laser-Spektroskopie" von W. Demtröder, Springer-Verlag 1991, S. 418 ff), auch Dispersionsseffekte höherer Ordnungen ausgeglichen werden.

Durch eine in Fig. 1 und 2 schematisch dargestellte Vergrößerung des Abstandes zwischen den Gittern 2.1, 2.4 ei-

nerseits sowie 2.2 2.3 andererseits, bzw. den Prismen 6.1, 6.4 einerseits sowie 6.2, 6.3 andererseits, durch Verschiebung der Elemente 2.2; 2.3 bzw. 6.2; 6.3 entlang der dargestellten Pfeilrichtung, werden die spektralen Wegunterschiede einstellbar vergrößert bzw. durch Verkleinerung des Abstandes verkleinert.

Beispielhaft ist hier gestrichelt jeweils eine zweite Stellung der Gitter bzw. Prismen 2.2; 2.3; 6.2; 6.3 dargestellt.

Damit ist eine Einstellung der Impulsbreite möglich, so daß nicht nur die von der Lichtleitfaser bewirkten Laufzeitunterschiede kompensierbar sind, sondern darüber hinaus Laufzeitunterschiede gezielt ausgeglichen werden können, die durch weitere dispersive Medien, insbesondere im Strahlengang des konfokalen Mikroskopes, wie beispielsweise Objektive, insbesondere mit hoher numerischer Apertur, das Scanobjektiv, die Tubuslinse, aber auch andere aus Glas bestehende optische Elemente, verursacht werden.

Die Verschiebung der Gitter oder Prismen entlang der dargestellten Pfeilrichtung kann durch hier nicht dargestellte, aber fachübliche und bekannte Maßnahmen, per Hand oder elektrisch angesteuert, erfolgen.

Die Erfindung gemäß Fig. 4-9 besteht aus einem einfallenden kurzen Laserpuls beam in einem Mittel PU zur Dispersion des Laserpulses, und einem auslaufenden Laserpuls beam out.

Eine Ausführungsform des erfindungsgemäßen Aufbaus ist in den Abb. 4-6 skizziert. Ein Vergleich der erfindungsgemäßen Einheit zu Anordnungen mit vier Prismen ist in Abb. 8a und 8b dargestellt.

Fig. 4-6

Der einlaufende kurze Laserpuls beam in trifft auf ein optisches Gitter (G), hier ein Reflexionsgitter.

Die Normale n des Gitters steht unter einem Winkel α zur Richtung des einlaufenden Laserstrahls. Gemäß dem Fourier-Theorem entspricht dem einlaufenden Laserpuls eine bestimmte spektrale Zusammensetzung im Frequenzraum. Durch die dispersive Wirkung des Gitters wird der einlaufende Laserpuls entsprechend der Gittergleichung, dargestellt in Fig. 7, in seine spektralen Komponenten zerlegt. Durch den Einsatz eines geblazten Gitters tritt hier nur die Beugung erster Ordnung auf.

Der so modifizierte divergente Laserstrahl wird in Richtung eines horizontal angeordneten Reflektorsystems DK1, bestehend aus zwei zueinander senkrechten angeordneten Spiegeln, vorzugsweise Planspiegeln, die ein Dachkantenspiegel-System (roof system) bilden, abgelenkt, das den Laserstrahl in gleicher Strahlhöhe auf dem Gitter, d. h. in einer Ebene und in gleicher Richtung (Winkel α) auf das Gitter zurückreflektiert. Durch Einsatz eines derartigen Reflektors wird vorteilhaft sichergestellt, daß das Gitter durch den Laserstrahl bei jedem der zwei Durchgänge unter demselben Einfallswinkel getroffen wird.

Nur unter diesen Umständen ist gewährleistet, daß ein einlaufender, um die optische Achse rotationssymmetrischer Laserstrahl auch nach zweifachem Durchlauf des Gitters noch ein rotationssymmetrisches Strahlprofil besitzt. Darüberhinaus ist für die erfindungsgemäße Funktionsweise des Aufbaus maßgeblich, daß die Abfolge des spektralen Verlaufs bei Reflexion an dem Retro-Reflektorsystem DK1 umgekehrt wird (eine einfache Spiegelung des spektral aufgeweiteten Laserstrahls resultiert nicht in demselben Ergebnis).

Das Gitter ist vorzugsweise geblazt, so daß nur die erste Ordnung der Strahlablenkung Verwendung findet.

Nach zweifachem Durchlauf des Laserstrahls über das Gitter besteht der Laserstrahl aus einem parallelen Laser-

strahlbündel, dessen Wellenlänge sich über den Strahlquerschnitt kontinuierlich von 'Rot' nach 'Blau' verändert. Dieses parallele Laserstrahlbündel trifft auf ein zweites, vertikal zu DK1 angeordnetes Reflektorsystem DK2, wiederum ein Dachkantenspiegel-System, das das Strahlbündel wieder unter dem Winkel α in Richtung des Gitters, aber in einer tiefer, gelegenen Ebene bezüglich des Gitters G reflektiert.

Auf der tiefer, gelegenen Ebene wird der oben beschriebene Strahlweg mit zwei weiteren Durchgängen durch das Gitter G wiederholt, so daß nach insgesamt vier Durchläufen des Laserstrahls über das Gitter G der Eingangsstrahl beam in jetzt jedoch mit durch die Einheit aufgeprägter negativer Dispersion und in einer tieferen Ebene am Ausgang der erfindungsgemäßen Einheit, über Umlenkspiegel M1 ausgekoppelt, als beam out zur Verfügung steht.

Diese Einheit stellt damit eine hochkompakte Ausführungsform einer konventionellen Pre-Chirp-Einheit, die gemäß Fig. 1 aus vier individuellen Gittern besteht, dar (siehe Vergleich mit eingezeichneten roten und blauen Wellenlängen in Abb. 8a und 8b). Während bei der Multi-Gitter-Anordnung die Justage der Einzelgitter mühsam aufeinander abgestimmt werden muß, ist sie bei der erfindungsgemäßen Einheit mit nur einem Gitter die Justage vollens unkritisch. Darüberhinaus ist die erfindungsgemäße Einheit deutlich kompakter, und damit stabiler, als die Vier-Gitter-Anordnung.

Die Ein- und Auskopplung von beam in und beam out bezüglich des in Fig. 1-3 dargestellten Strahlenganges von der Laserlichtquelle 1 in Richtung der Lichtleitfaser 4 wird gegenüber Fig. 1-3 derart modifiziert, daß die PU gemäß Fig. 4-6 zwischen der Laserquelle 1 und der Einkoppeleinheit 3 angeordnet ist.

In Fig. 9 ist eine derartige Anordnung schematisch dargestellt, wobei nur der Umlenkspiegel M1 dargestellt ist. Beam in und beam out stehen hier im Gegensatz zu Fig. 1-3 senkrecht zueinander.

Das eine Gitter G1, als Bestandteil der erfindungsgemäßen Einheit PU, ist wie in Fig. 4 beispielhaft dargestellt, um einen Drehpunkt d senkrecht zur Zeichenebene, der durch den Schnittpunkt des einlaufenden Strahl mit der Gitteroberfläche gebildet wird, über eine Ansteuereinheit S1 oder von Hand drehbar, gelagert. Durch alleinige Drehung des Gitters um diese Achse (Achse, die senkrecht zur Strahlebene liegt und durch den oben beschriebenen Drehpunkt läuft) um den Winkel α , kann die Einheit, entsprechend der Gittergleichung (Fig. 7) auf eine bestimmte Wellenlänge, λ_0 , des Fourspektrums optimiert werden, ohne daß eine weitere optische Komponente bewegt werden muß.

Das ist bei Veränderung der Wellenlänge des eingestrahlten Lasers von Bedeutung, um das System bezüglich der Reflektoren DK1 und DK2 zu justieren.

Bei geeignet ausgewähltem Gitter - der Gittereffizienz kann die Anordnung hinreichend unempfindlich gegenüber der Wellenlänge sein, so daß die Anordnung problemlos über einen weiten Wellenlängenbereich von einigen 100 nm vorteilhaft eingesetzt werden kann, wenn die Gittereffizienz so gewählt ist, daß sich der Wirkungsgrad des Gitters innerhalb des Wellenlängenbereichs nicht ändert.

Drehpunkt d ist der Punkt, um den das Gitter (G) zur Abstimmung der Wellenlänge gedreht werden muß. Dabei kann die Drehbewegung durch eine Translationsbewegung über S1 auf das Gitter übertragen werden. DK1 und DK2 bezeichnen Dachkantenspiegelsysteme. Der Laserstrahl kann, bevor er auf das Gitter trifft, mittels eines nicht dargestellten Strahlaufweiteres auf einen geeigneten Strahldurchmesser aufgeweitet werden. Dies reduziert die Laserintensität auf dem Gitter (zur Vermeidung der Zerstörung der Gitteroberfläche durch die i.a. intensive Laserstrahlung). Darüberhin-

aus ist bei dem erfindungsgemäßen Aufbau gewährleistet, daß die Polarisation der Laserstrahlung auf der Gitteroberfläche bei jeder Reflexion identisch ist (insbesondere ist die Reflektivität dann am höchsten, wenn die Polarisation senkrecht zur Furchenrichtung des Gitters ist). Der Pfeil bezeichnet die Richtung, in die der Retro-Reflektor DK1 über S2 verschoben werden muß, um die Gesamtdispersion des Aufbaus kontinuierlich zu verändern. Eine Reduzierung des Abstands zwischen Gitter und DK1 verringert i.a. den Betrag der negativen Dispersion, der durch die Einheit auf den Laserstrahl aufgeprägt wird.

Durch Veränderung des Abstands des Retro-Reflektorsystems DK1 vom Gitter über eine Steuereinheit S2 oder von Hand, kann die (i.a. negative) Dispersion der erfindungsgemäßen Einheit kontinuierlich modifiziert werden. Damit erlaubt die Einheit in einfacher Weise, d. h. durch Verstellung nur eines Freiheitsgrades, den Chirp des Laserstrahls an die Erfordernisse des optischen Systems anzupassen.

Bildet man das Reflektorsystem DK2 als Spiegel aus, ist eine Verschiebung von DK1 mit einer Positionsveränderung von beam out verbunden, die bei der Fasereinkopplung entsprechend nachgestellt werden muß.

Bei einer Drehung des Gitters G um Drehpunkt d ist eine derartige Anordnung ohne Nachstellung bezüglich der Position von beam out verwendbar.

Patentansprüche

1. Vorrichtung zur Einkopplung der Strahlung von Kurzpuls-Lasern in einen mikroskopischen Strahlengang wobei die Einkopplung mittels mindestens einer dem Laser nachgeordneten Lichtleitfaser erfolgt.
2. Vorrichtung nach Anspruch 1, wobei die Einkopplung in einen konfokalen Strahlengang erfolgt und das Faserende auf ein Objekt abgebildet wird.
3. Vorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, wobei das Mikroskop ein Laserscanningmikroskop ist.
4. Vorrichtung nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche wobei die Einkopplung über mindestens eine Monomodefaser erfolgt.
5. Vorrichtung nach mindestens einem der vorangehenden Ansprüche wobei zwischen Laser und Lichtleitfaser eine optische Anordnung zur wellenlängenabhängigen zeitlichen Veränderung der Laserpulse vorgesehen ist.
6. Vorrichtung nach Anspruch 5, wobei die Anordnung ein Beugungsgitter, sowie ein Reflektorsystem und einen Spiegel, oder ein Beugungsgitter und zwei Reflektorsysteme enthält, und der Laserstrahl viermal über dasselbe Beugungsgitter geführt wird.
7. Vorrichtung nach Anspruch 5, wobei die Anordnung nur ein einziges Beugungsgitter, sowie ein Retro-Reflektorsystem und einen Spiegel, oder ein Beugungsgitter und zwei Retro-Reflektorsysteme enthält, und der Strahl viermal über dasselbe Beugungsgitter geführt wird und die Einheit auf die Laserwellenlänge durch alleinige Drehung des einen Gitters justiert werden kann.
8. Vorrichtung nach Anspruch 5, wobei die Anordnung ein Beugungsgitter, sowie ein Reflektorsystem und einen Spiegel, oder ein Beugungsgitter und zwei Reflektorsysteme enthält, und der Strahl viermal über dasselbe Beugungsgitter geführt wird und der Betrag der Dispersion durch die Veränderung des Abstandes von Beugungsgitter und einem Reflektorsystem vari-

iert wird.

Hierzu 9 Seite(n) Zeichnungen

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

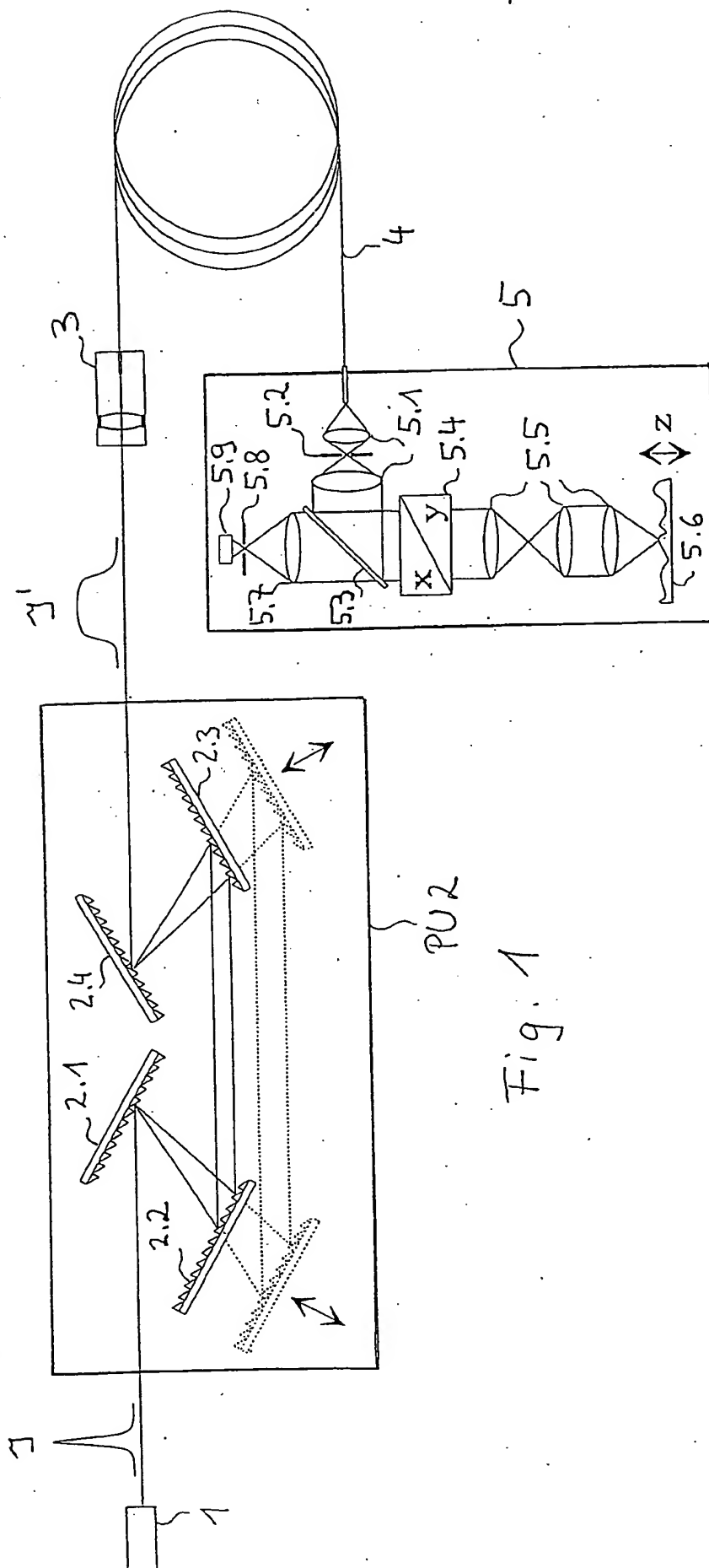
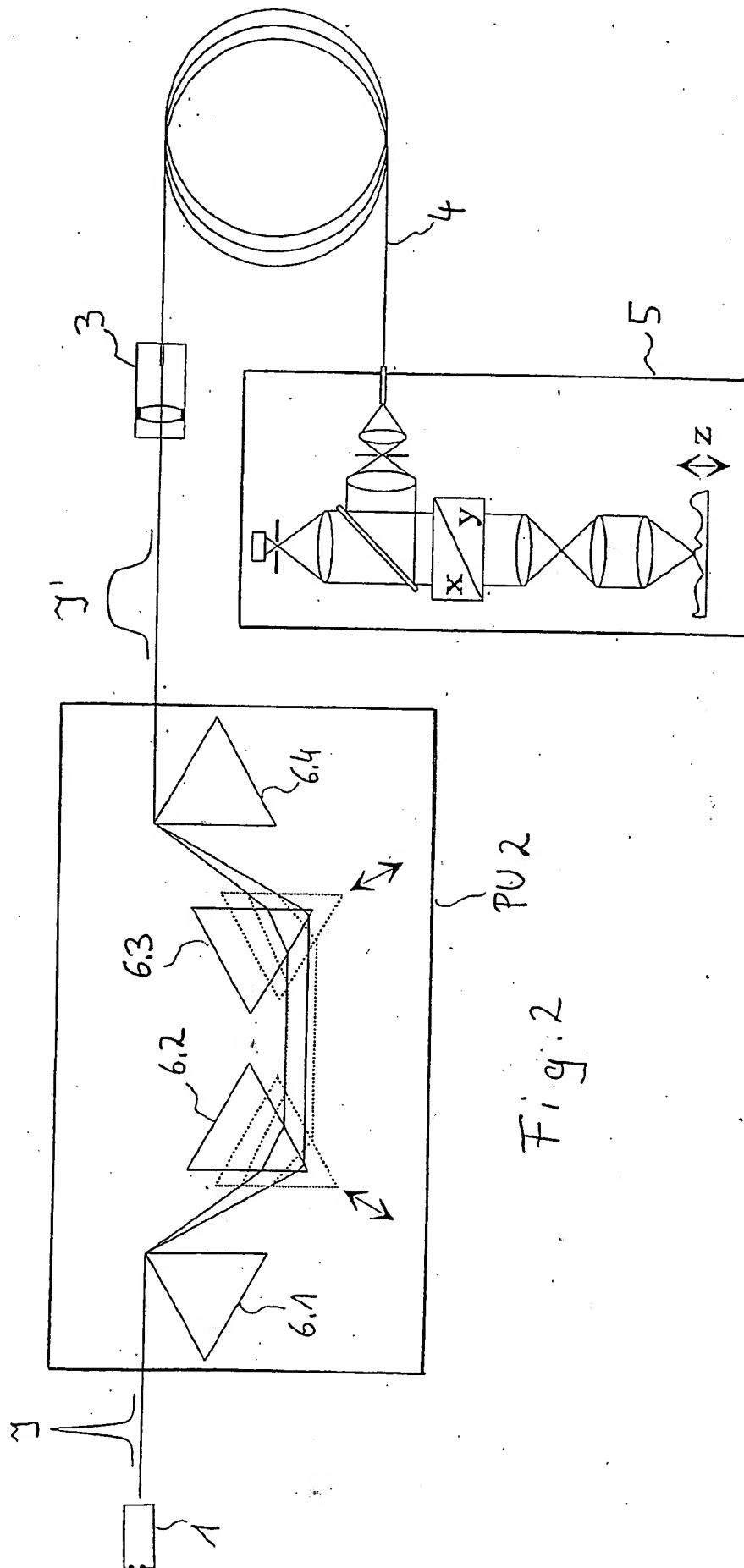


Fig. 1



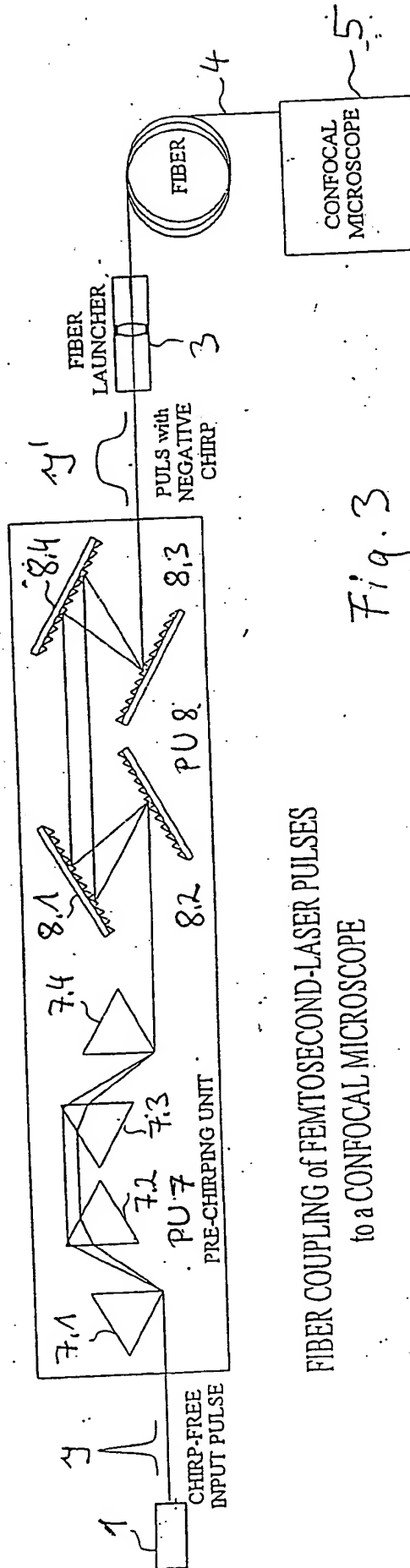


Fig. 3

FIBER COUPLING of FEMTOSECOND-LASER PULSES
to a CONFOCAL MICROSCOPE

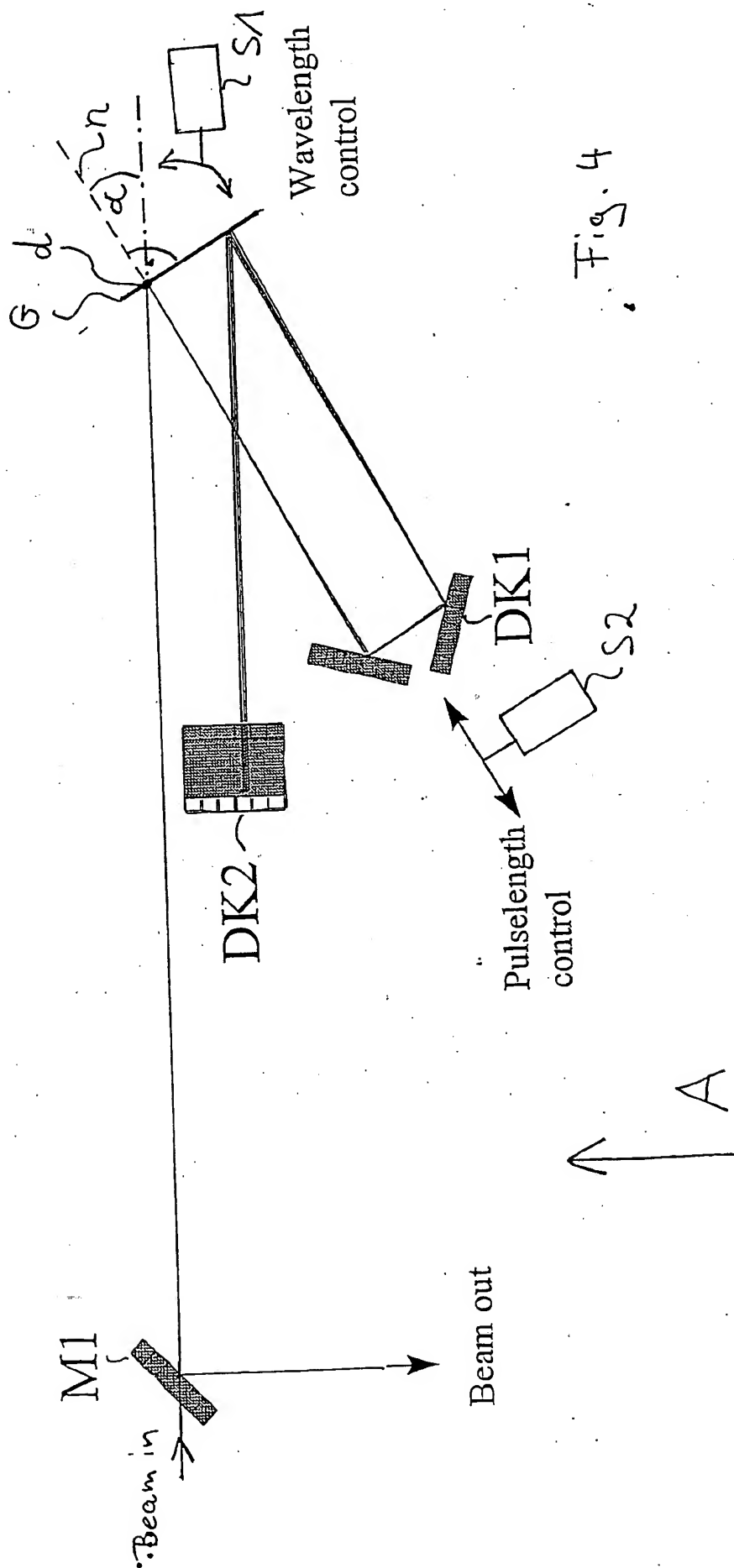
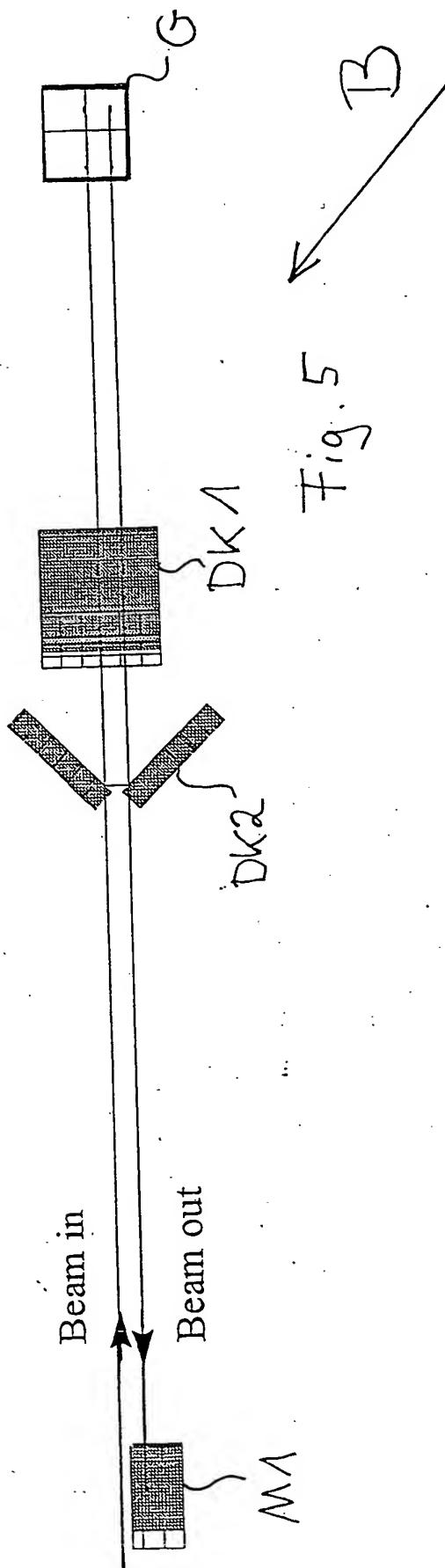


Fig. 4



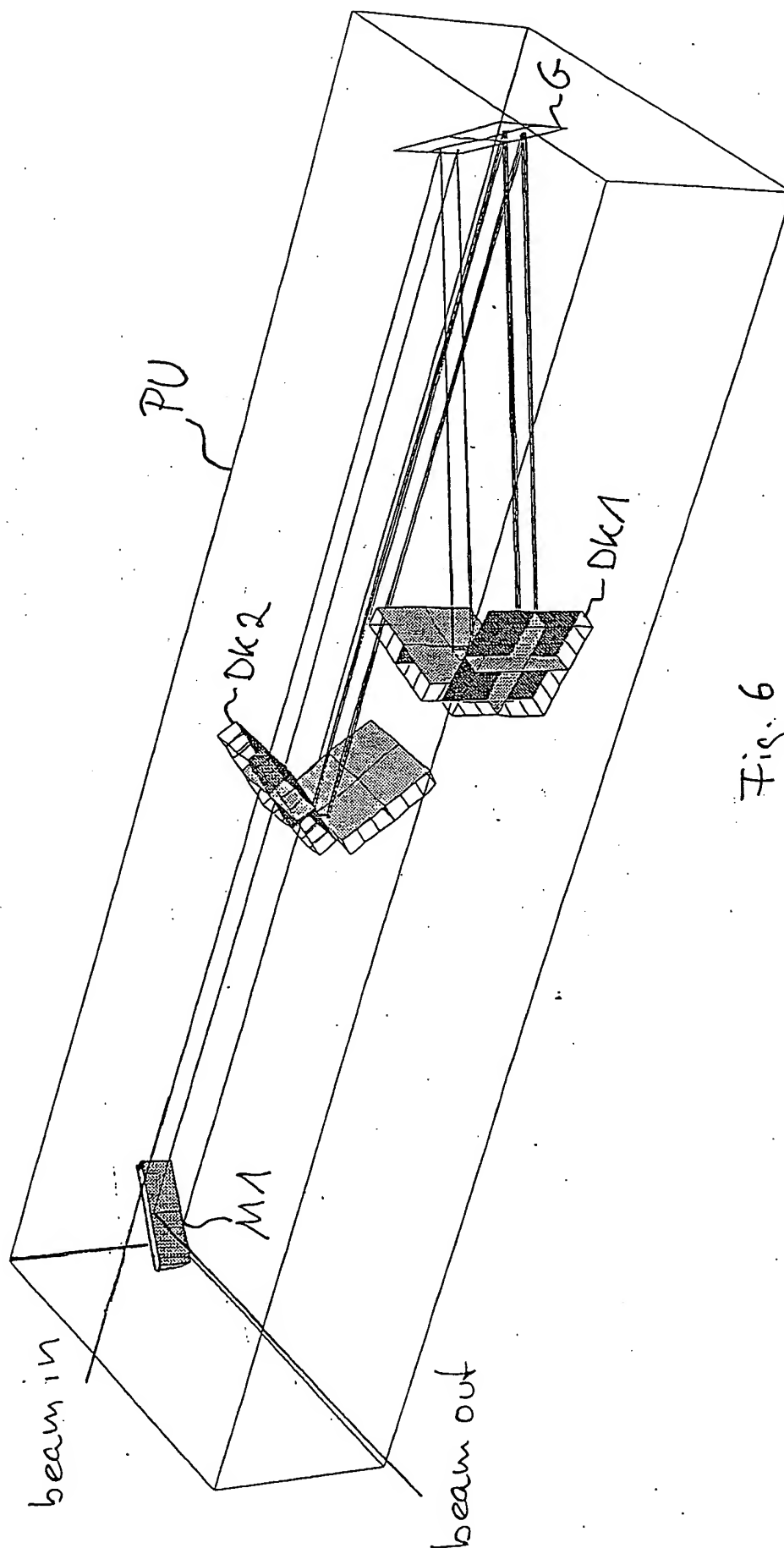


Fig. 6

Gittergleichung

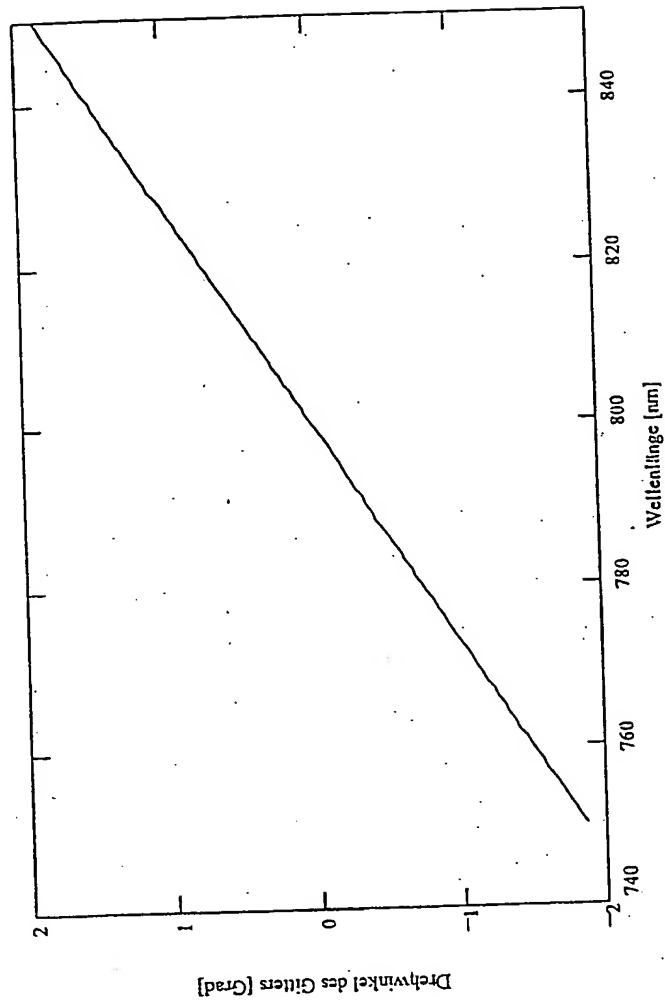
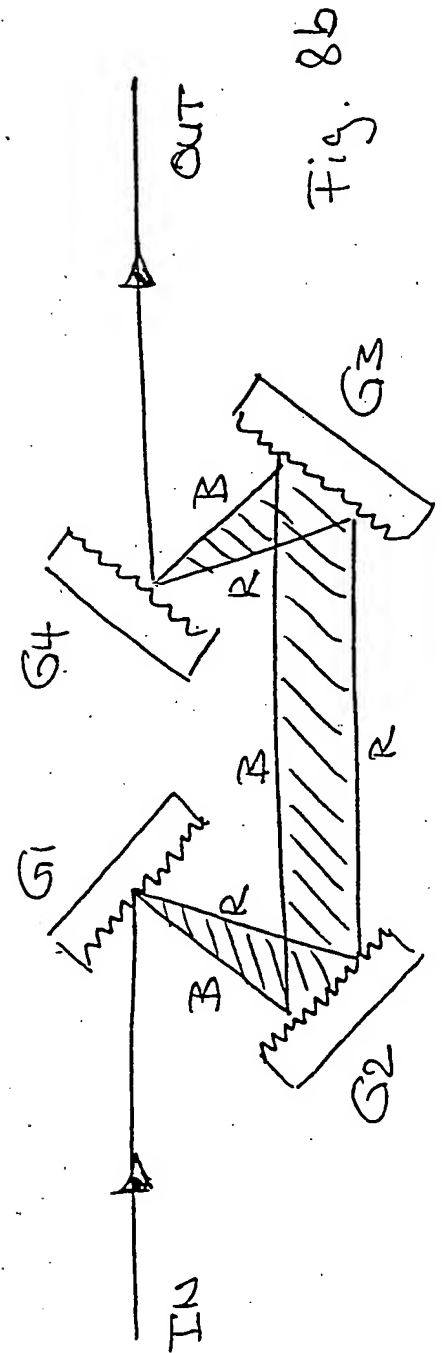
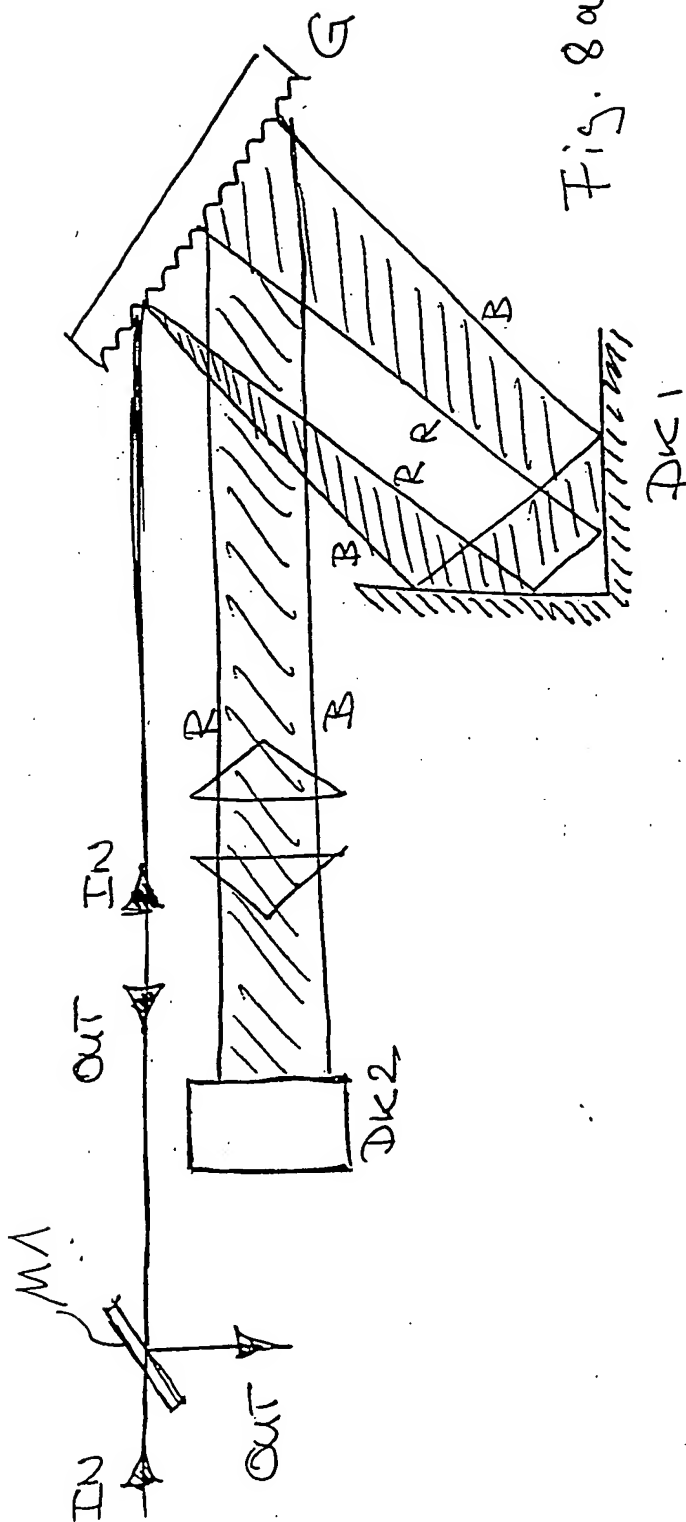


Fig. 7

d: Gitterperiode
 m: Ordnungszahl
 λ : Wellenlänge
 α : Einfallswinkel
 β : Beugungswinkel

$$d(\sin \alpha + \sin \beta) = m \lambda$$

R: Rot
B: Blau



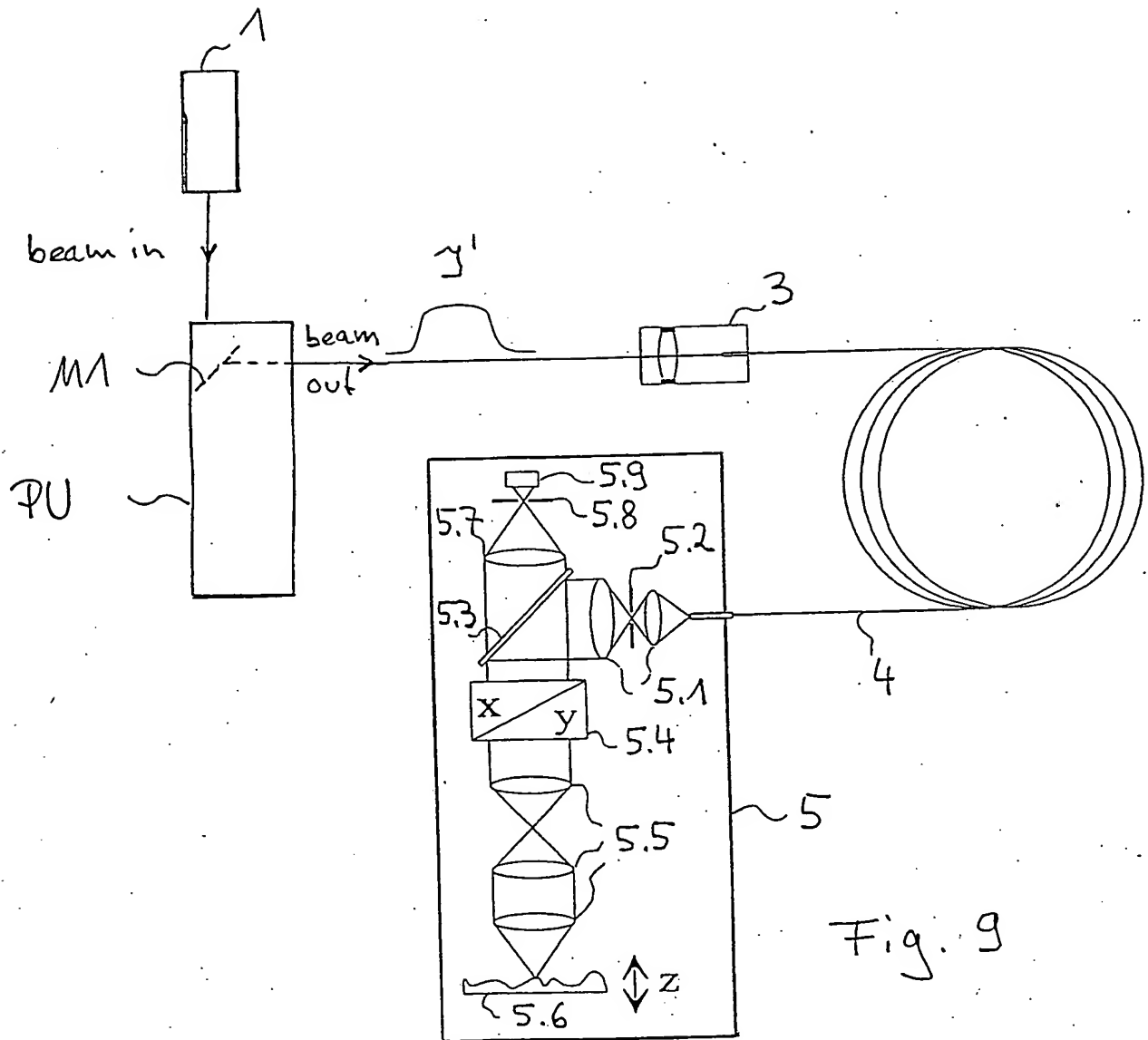


Fig. 9